

Berichts.-Nr.:

DLR-IB 224-2014 A 103

Verfasser:

Steffen Risius

Titel:

**Entwurf eines Messsystems zur instationären
quantitativen TSP Messung am kryogenen
Rohrwindkanal Göttingen (KRG)**

Datum: 15.08.2014

Auftraggeber:

Förderkennz.:

Vorgesehen für:

Der Bericht

21 Seiten einschl.

4 Tabellen

20 Bilder

0 Literaturstellen

Vervielfältigung und Weitergabe dieser Unterlagen sowie Mitteilung ihres Inhalts an Dritte, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung ☒ des DLR ☒ des Auftraggebers.

DLR

**Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
Bunsenstraße 10
37073 Göttingen
Germany
Abteilung AS-EXV**



Entwurf eines Messsystems zur instationären quantitativen TSP Messung am kryogenen Rohrwindkanal Göttingen (KRG)

Kurzfassung:

Dieser Bericht beschreibt, wie mit einem neuen Periskop-Aufbau eine flexiblere Kamerawahl bei TSP-Messungen am kryogenen Rohrwindkanal Göttingen (KRG) getroffen werden kann. Dies kann zu einer deutlichen Verbesserung der zeitlichen und räumlichen Auflösung von TSP Messungen führen, die tiefere Einblicke in die strömungsphysikalischen Vorgänge erlauben. Die pco.edge-Kamera wurde für den Einsatz bei TSP Messungen im KRG getestet. Dazu wurde die Kamera bei den im KRG vorliegenden Druckbedingungen, bis 8,5 bar, und bei Temperaturen bis -8°C getestet. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass eine quantitative Temperaturmessung mit der pco.edge prinzipiell möglich ist und mit der Messung älterer Kameramodelle (pco.pixelfly und pco.sensicam) übereinstimmt.

DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.

Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik

Institutsleiter::

(Prof. Dr. Andreas Dillmann)

Verfasser:

(Steffen Risius)

Abteilungsleiter:

(Dr. Lars Koop)

Datum:	22.09.2014	Abteilung:	Experimentelle Verfahren	Bericht:	224-2014 A 103
Bearbeitet:	Ilka Micknaus				

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
Abkürzungen	2
1 Einleitung	3
2 Aufbau im KRG	3
2.1 Derzeitiger Kameraaufbau für TSP-Messungen	3
2.2 Neuer Periskop-Aufbau	3
3 Beschreibung der pco.edge	5
3.1 Aufnahmemodi	6
4 Test der pco.edge	7
4.1 Temperaturverträglichkeit	7
4.2 Druckverträglichkeit	8
4.2.1 Aufbau des Drucktests	8
4.2.2 Durchführung der Drucktests	10
4.2.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen	13
4.3 TSP-Kalibrierung	14
4.4 Vergleich der normalisierten Intensitäten	16
4.5 Vergleich der relativen Temperaturempfindlichkeit	16
5 Ausblick	21
6 Danksagung	21

Zusammenfassung

Dieser Bericht beschreibt, wie mit einem neuen Periskop-Aufbau eine flexiblere Kamerawahl bei TSP-Messungen am kryogenen Rohrwindkanal Göttingen (KRG) getroffen werden kann. Dies kann zu einer deutlichen Verbesserung der zeitlichen und räumlichen Auflösung von TSP Messungen führen, die tiefere Einblicke in die strömungsphysikalischen Vorgänge erlauben. Die pco.edge-Kamera wurde für den Einsatz bei TSP Messungen im KRG getestet. Dazu wurde die Kamera bei den im KRG vorliegenden Druckbedingungen, bis 8,5 bar, und bei Temperaturen bis -8°C getestet. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass eine quantitative Temperaturmessung mit der pco.edge prinzipiell möglich ist und mit der Messung älterer Kameramodelle (pco.pixelfly und pco.sensicam) übereinstimmt.

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
DNW	Deutsch-Niederländische Windkanäle
ETW	European Transonic Windtunnel
fps	frames per second
GS	Global Shutter
KRG	Kryogener Rohrwindkanal Göttingen
LWL	Lichtwellenleiter
TSP	Temperature Sensitive Paint
RS	Rolling Shutter

1 Einleitung

Seit ca. 10 Jahren werden Messungen mit Hilfe von *Temperature Sensitive Paint* (TSP) am kryogenen Rohrwindkanal Göttingen (KRG) durchgeführt. Um die zeitliche und räumliche Auflösung von TSP Messungen am KRG signifikant zu verbessern, ist es notwendig den TSP-Aufbau am KRG neu zu gestalten. Der bisherige Aufbau erlaubt nur den Einsatz sehr kleiner Kameramodelle (pco.pixelfly), da der räumliche Zugang stark beschränkt ist. Eine Verbesserung der Auflösung kann nur durch den Einsatz größerer Kameras erreicht werden. Der vorliegende Bericht zeigt einen neuen Entwurf mit dem die Kamerawahl deutlich flexibler gestaltet werden kann (Kapitel 2.2).

Ein Kameramodell, das deutliche Verbesserungen in der zeitlichen und räumlichen Auflösung ermöglichen würde, ist die pco.edge. Für "warme" TSP Messungen bis -8°C wurde die pco.edge zunächst auf Temperaturverträglichkeit getestet (Kapitel 4.1). Da der Windkanal auf bis zu 8 bar Überdruck gebracht werden kann, wurde danach untersucht, ob die pco.edge bei diesem Druck betrieben werden kann (Kapitel 4.2). Darüber hinaus wurde getestet, ob mit der Kamera auch quantitative Temperaturmessung durchgeführt werden können. Dazu wird am Ende diesen Berichts eine TSP-Kalibrierung der pco.edge mit Kalibrierungen der pco.sensicam und pco.pixelfly verglichen.

2 Aufbau im KRG

2.1 Derzeitiger Kameraaufbau für TSP-Messungen

Bisher wird am KRG die pco.pixelfly zur TSP-Messung eingesetzt. Die Kamera schaut über ein Pinhole-Objektiv direkt in die Messstrecke (Abbildung 1). Die pco.pixelfly ist eine 12 bit Kamera, mit einer Auflösung von 1392 Pixel x 1024 Pixel und einer maximalen Bildaufnahmefrequenz von 10 Hz. Um eine signifikant höhere Auflösung und Bildaufnahmefrequenz zu erreichen muss eine größere Kamera verwendet werden. Der gezeigte Aufbau lässt sich jedoch nicht mit einer größeren Kamera realisieren, da nur die pco.pixelfly so klein ist, dass sie ohne anzustoßen in dem Plenum vom KRG untergebracht werden kann. Daher wird in diesem Bericht ein alternativer Kameraaufbau für TSP Messungen am KRG vorgeschlagen.

2.2 Neuer Periskop-Aufbau

Der neue Entwurf sieht vor, dass die Kamera nicht direkt in die Messstrecke vom KRG gerichtet wird, sondern indirekt über zwei Spiegel in die Messstrecke schaut. Dieser Entwurf hat den Vorteil, dass hinter den Spiegeln eine Kamera von nahezu beliebiger Größe installiert werden kann. Ein weiterer Vorteil ist, dass ein größerer Teil des Kamerachips für die Aufnahme genutzt wird, was zu einer weiteren Erhöhung der Ortsauflösung führt. Dies erkennt man besonders deutlich, wenn man die Bilder 2 und 3 vergleicht. Die schwarzen Bereiche entsprechen dem ungenutzten Teil des Chips, der

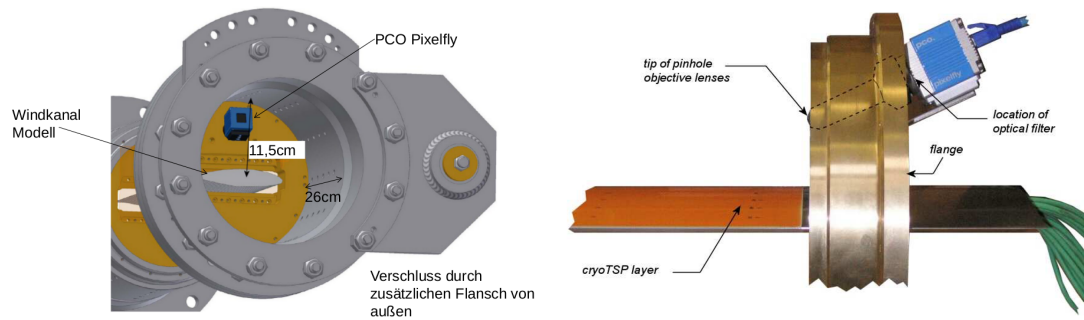


Abbildung 1: Derzeitiger Aufbau der pco.pixelfly Kamera im Flansch vom KRG mit Pinhole-Objektiv.

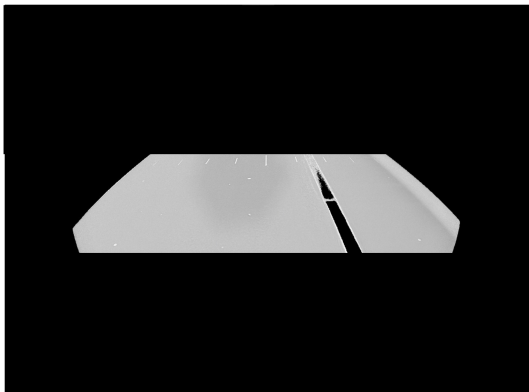


Abbildung 2: Aufnahme der pco.pixelfly mit Pinhole-Objektiv im KRG (Auflösung: 1392x1040).

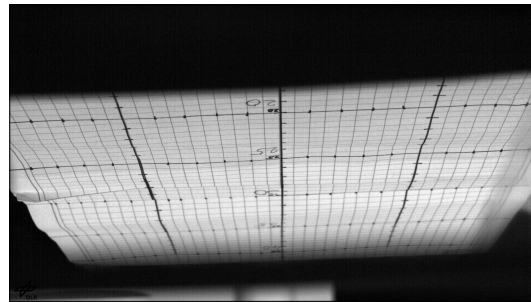


Abbildung 3: Aufnahme der pco.edge mittels Periskop-Aufbau (Auflösung: 1920x1080).

für die pco.edge, durch die Auswahl der “region of interest”, noch weiter angepasst werden kann, um die zeitliche Auflösung weiter zu erhöhen.

Einige Fotos des vorgeschlagen Periskop-Aufbaus sind in den Abbildungen 4 bis 6 zu sehen. Der graue Karton stellt ein 1:1-Modell des KRG-Flansches dar (Messing in Abbildung 1), während das karierte Papier davor der Größe eines Windkanalmodells entspricht.

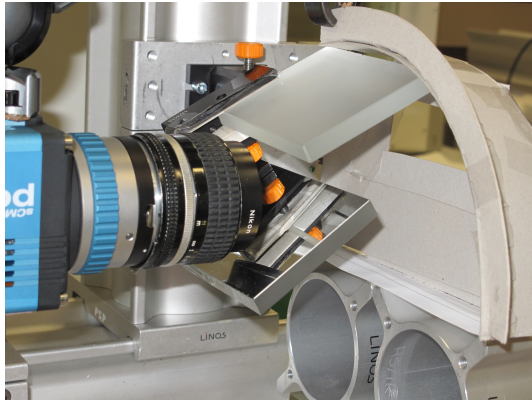


Abbildung 4: Periskop-Aufbau von hinten.



Abbildung 5: Persikop-Aufbau seitlich.



Abbildung 6: Periskop-Aufbau von vorne.

3 Beschreibung der pco.edge

Um zeitlich und räumlich höhere Auflösungen bei TSP Messungen im KRG zu erreichen, wurde die CMOS-Kamera pco.edge getestet. Die pco.edge kann mit zwei unterschiedlichen Pixel-Abtastraten betrieben werden: 286 MHz (fast scan) oder 95,3 MHz (slow scan). Die Kamera hat eine Auflösung von maximal 2560 Pixel x 2160 Pixel, bei der eine maximale Aufnahmefrequenz von 50 Hz im “global shutter” (GS) Modus erreicht wird. Bei einer Verringerung der Auflösung kann die Aufnahmefrequenz erhöht

werden (Tabelle 7). Für die Messung im KRG bietet sich eine Auflösung von 1920 Pixel x 1080 Pixel an (Abbildung 3), bei der bis zu 100 Hz erreicht werden können.

frame rate table

typical examples	RS fast scan	GS	RS slow scan
2560 x 2160	100 fps	50 fps	33 fps
2560 x 1024	212 fps	105 fps	70 fps
2560 x 512	422 fps	208 fps	140 fps
2560 x 256	838 fps	409 fps	279 fps
2560 x 128	1651 fps	789 fps	550 fps
1920 x 1080	201 fps	100 fps	67 fps
1600 x 1200	181 fps	90 fps	60 fps
1280 x 1024	212 fps	105 fps	70 fps
640 x 480	450 fps	222 fps	150 fps
320 x 240	893 fps	436 fps	297 fps

Abbildung 7: Übersicht über Auflösungen und Aufnahmefrequenzen der pco.edge, abhängig vom Shutter-Modus (*Rolling Shutter [RS]* oder *Global Shutter [GS]*) und Pixel-Abtastrate (*fast scan* oder *slow scan*). Quelle: pco.edge user manual.

Um herauszufinden, ob sich die Kamera für eine Messung im KRG grundsätzlich eignet, wurde die pco.edge zwischen dem 1. April und 15. Mai 2014 im DLR Göttingen und bei der Firma PCO getestet. Dabei wurde zunächst untersucht, ob die Kamera bei Plenumsdruck (Kapitel 4.2) und Temperaturen bis -8°C (Kapitel 4.1) betrieben werden kann. Danach wurde getestet, ob mit der Kamera auch quantitative Temperaturmessungen mit TSP durchgeführt werden können (Kapitel 4.3).

3.1 Aufnahmemodi

Eine Besonderheit des CMOS-Chips ist, dass jedes Pixel vor der Aufnahme einmal zurückgesetzt werden muss (*reset*), um das Untergrundrauschen abziehen. Dieser *reset* kann entweder für jede Reihe einzeln geschehen (*rolling shutter*) oder für alle Pixel gleichzeitig (*global shutter*). Der Nachteil des *rolling shutters* besteht darin, dass nicht alle Pixel gleichzeitig belichtet werden, sondern Reihe für Reihe von oben und unten zur Mitte hin. Der Auslesevorgang pro Reihe dauert $9,17\ \mu\text{s}$ (*fast scan*), so dass sich bei maximaler Auflösung eine Verschiebung von ca. 10 ms ergibt. Diese Aufnahmetechnik ist besonders gut geeignet für gepulste Belichtungen, denn dann kann die simultane Belichtung aller Pixel durch die Belichtung sichergestellt werden (Abbildung 8).

Im *global shutter* Modus hingegen, wird zunächst für alle Pixel gleichzeitig ein *reset* mit der vorgesehenen Belichtungsdauer durchgeführt und als "reset-Dunkelbild" gespeichert. Danach werden alle Pixel gleichzeitig belichtet und im Anschluss daran wird das "reset-Dunkelbild" abgezogen, um das Rauschen zu minimieren (Abbildung 9). Durch die Aufnahme des Dunkelbildes halbiert sich die maximale Aufnahmefrequenz

im *global shutter* Modus im Vergleich zum *rolling shutter* Modus. Für kontinuierlich beleuchtete TSP Messungen ist jedoch der *global shutter* Modus zu bevorzugen, da nur so sichergestellt werden kann, dass alle Pixel zeitgleich belichtet werden. Dies ist von besonderer Bedeutung, wenn man zeitlich veränderliche Strukturen untersuchen möchte oder die räumliche Verteilung von Wärmeübergängen mit TSP messen möchte.

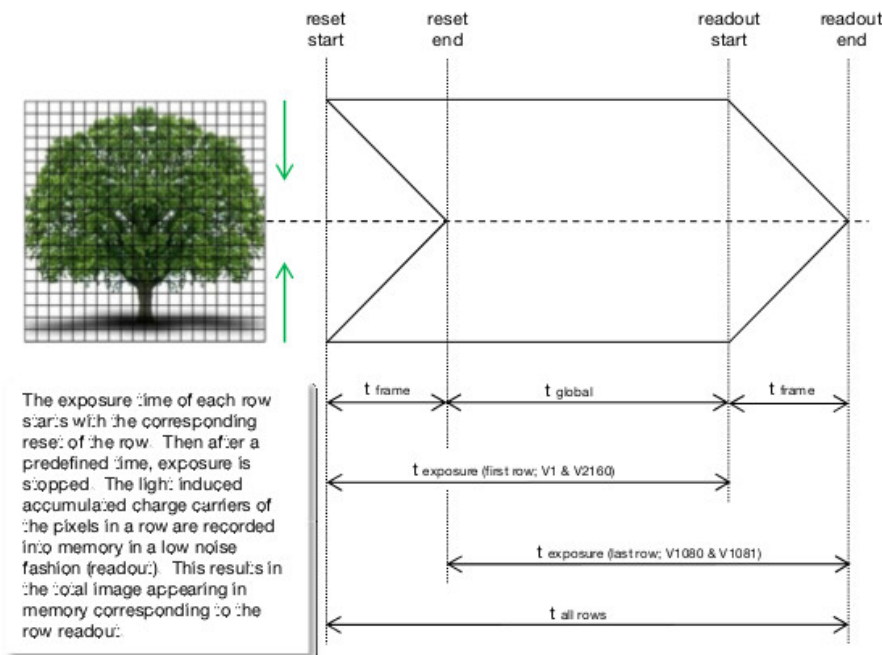


Abbildung 8: Schematischer zeitlicher Ablauf beim *rolling shutter* (Quelle: pco.edge user manual).

4 Test der pco.edge

4.1 Temperaturverträglichkeit

Durch die Verwendung von Stickstoff als Messgas, kann der KRG grundsätzlich bei Temperaturen bis zu $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ betrieben werden. Für viele Messungen ist allerdings ein Temperaturbereich zwischen $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausreichend, so dass die Verwendung der Kamera zunächst in diesem Temperaturbereich getestet wurde. Da die Kamera bisher noch nicht unterhalb des Gefrierpunktes eingesetzt wurde, hat die Firma PCO die pco.edge auf den Einsatz bei Temperaturen von bis zu $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ untersucht.

Zum Temperaturtest wurde die Kamera in einer Klimabox untergebracht und bei einer Temperatur von $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ kalt gestartet. Der Temperaturverlauf des CMOS-Chips ist in Abbildung 10 für beide Pixelabtastraten (*slow scan* und *fast scan*) gezeigt. Bei einer Abtastrate von 95 MHz erreicht der Chip nach ca. 30 Minuten die vorgesehene Betrieb-

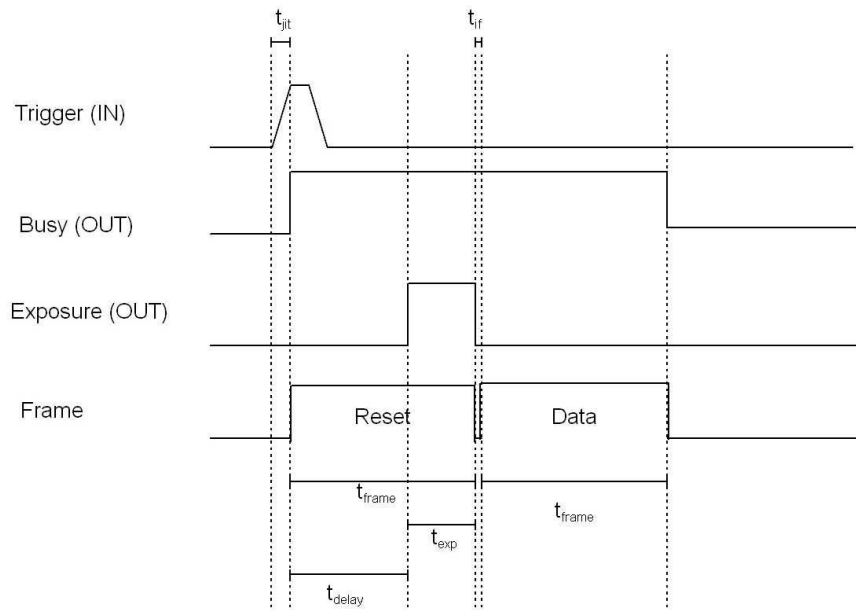


Abbildung 9: Schematischer zeitlicher Ablauf beim *global shutter* (Quelle: pco.edge user manual).

temperatur von $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bei einer Abtastrate von 286 MHz wird die Betriebstemperatur von $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ nach ca. 60 Minuten erreicht. Es ist daher möglich die pco.edge auch bei einer Temperatur von -8°C zu starten und zu betreiben, sofern genügend Aufwärmzeit für den CMOS-Chip zur Verfügung steht.

4.2 Druckverträglichkeit

Da der KRG bei einem Überdruck von bis zu 8 bar betrieben wird, war es notwendig die Kamera auf ihre Druckverträglichkeit hin zu testen. Bei der Kamera wurden durch PCO folgende Schwachstellen und Symptome vermutet:

1. **Die Abdichtung des Kühltubus:** Je nach Temperatur und Feuchtigkeit der Umgebungsluft wird entweder die Sensortemperatur nicht mehr erreicht, oder es bildet sich Feuchtigkeit auf dem Sensor.
2. **Das Eingangsglas:** Zu erwarten ist ein Bruch des Eingangsglases bei Druckbeanspruchung, unklar ist jedoch bei welchem Druck. Ein entsprechender Bruch ist aber im Bild erkennbar, bzw. treten nach dem Bruch die selben Symptome wie bei 1. auf.

4.2.1 Aufbau des Drucktests

Zum Test der Druckverträglichkeit wurde die pco.edge in die alte Messstrecke des KRG eingebaut (Abbildung 12a). Die Kamera wurde auf ein kariertes Papier gerichtet, wel-

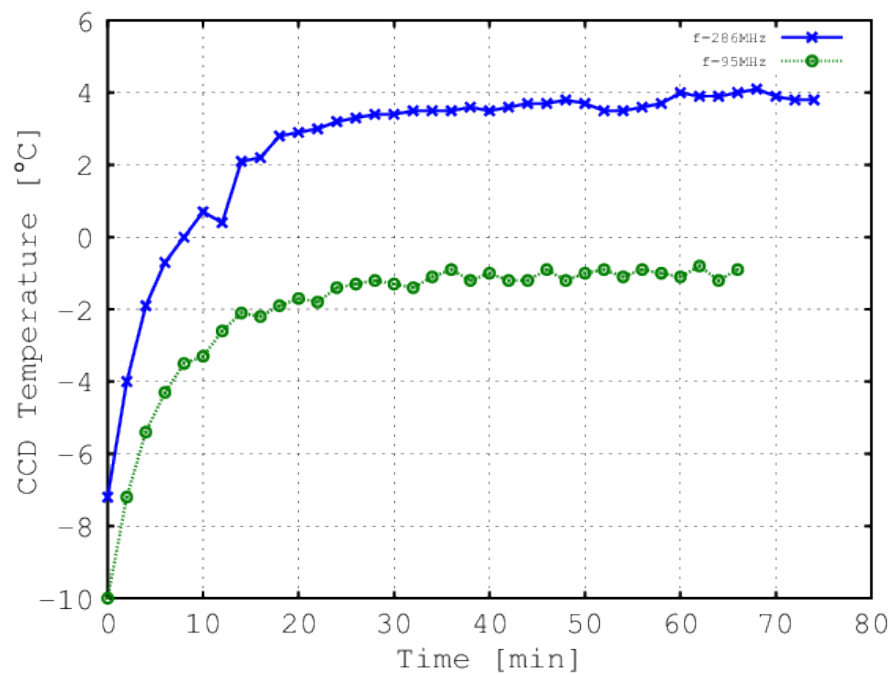
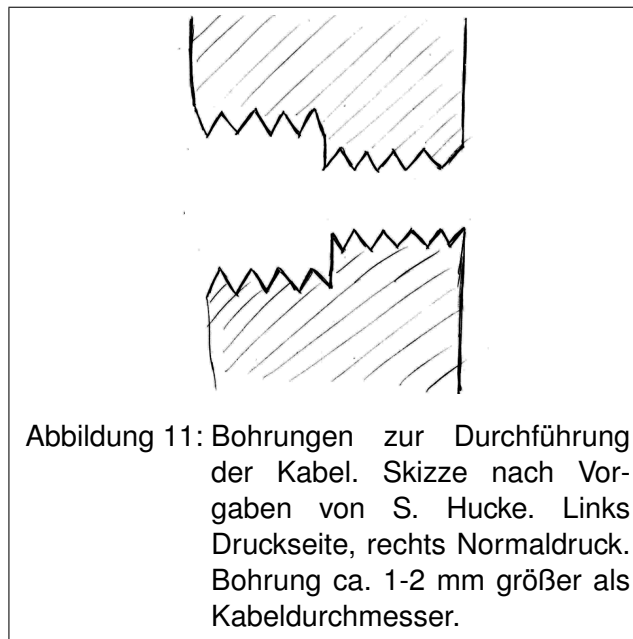


Abbildung 10: Temperatur des CMOS-Chips der pco.edge bei einem Start der Kamera bei -8°C , bei einer Pixelabtastrate von 286 MHz (blau) und 95 MHz (grün), als Funktion der Zeit.

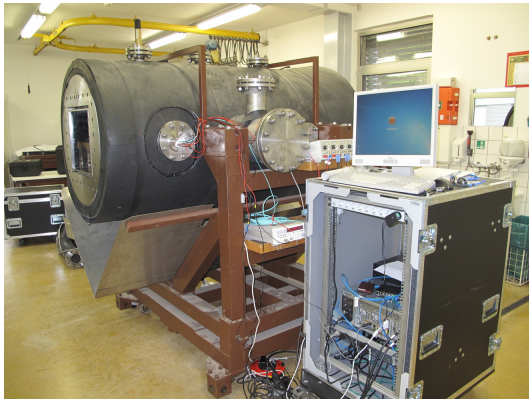
ches mit bis zu zwei LEDs beleuchtet wurde (Abbildung 13). Für die Stromversorgung und Signalübertragung durch die Wand des Druckbehälters wurde ein Flansch gefertigt, in dem die notwendigen Kabel und Lichtleiter eingeklebt wurden (Abbildung 12b). Zur Signalübertragung der pco.edge auf den PC werden grundsätzlich zwei CameraLink-Kabel benötigt. Da sich die Durchführung der CameraLink-Kabel durch den Flansch jedoch nicht kurzfristig umsetzen ließ, wurde das Signal über einen Lichtwellenleiter (LWL) aus dem Druckbehälter herausgeführt. Dafür wurde das Signal durch CameraLink-LWL-Konverter der Firma Phrontier (PHOX-FL-L10) konvertiert.

Durchführung der Kabel Zur Durchführung der Kabel in den Druckbehälter wurde ein Flansch mit Gewindebohrungen versehen. Diese Bohrungen wurden auf der Druckseite mit einem 1-2 mm größeren Durchmesser versehen, als auf der Außenseite, wo sie ca. 1-2 mm größer als der Kabeldurchmesser waren (Abbildung 11). Nachdem die Kabel durch den Flansch durchgeführt und auf die benötigte Länge gekürzt waren, wurden die Bohrungen mit Epoxidharz von beiden Seiten ausgegossen.

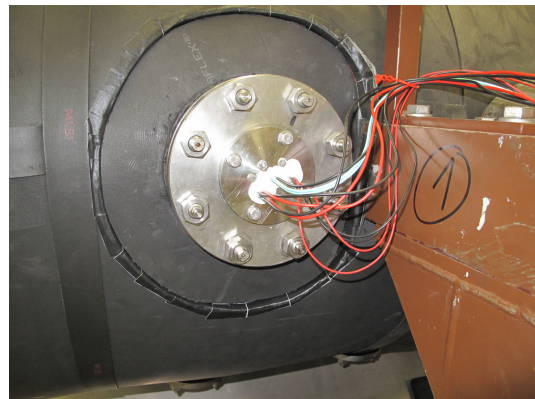


4.2.2 Durchführung der Drucktests

Der gesamte Drucktest wurde mit der pco.edge Kamera mit der Seriennummer 162 in der alten Messstrecke des KRG durchgeführt. Die alte Messstrecke konnte auf einen Überdruck von bis zu 9 bar aufgepumpt werden. In diesem Bericht bezeichnet "Druck" stets den Überdruck über dem Atmosphärendruck.



(a) Übersicht über den Versuchsaufbau im Druckbehälter.



(b) Durchführung der Kabel in die Messstrecke.

Abbildung 12: Versuchsaufbau in der alten Messstrecke des KRG.

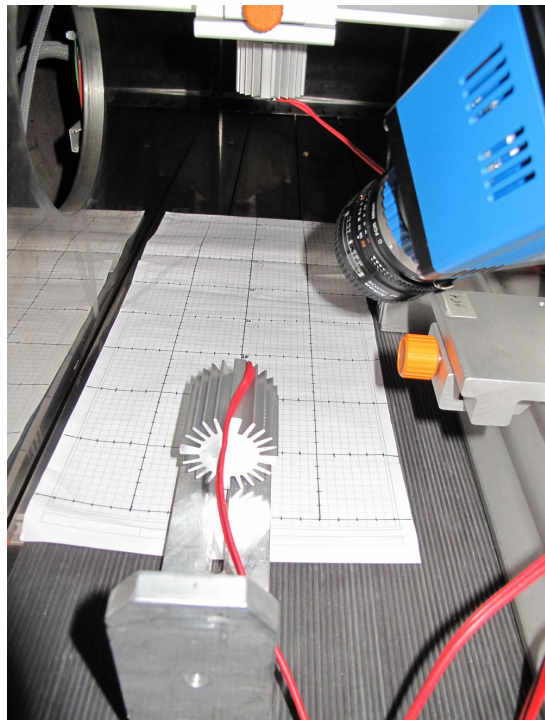
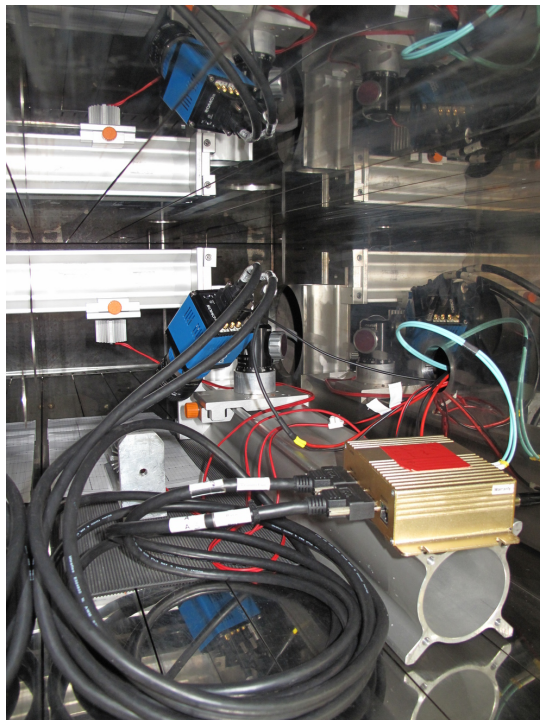


Abbildung 13: Aufbau innerhalb des Druckbehälters.

Langsame Erhöhung des Drucks Da eine Undichtigkeit des Kühltubuses nicht zwangsläufig unmittelbar sichtbar sein würde, wurde der erste Drucktest sehr langsam durchgeführt. Nach jeder Druckerhöhung um 1 bar wurde eine Pause von mindestens 15 Minuten eingelegt. Der Druck wurde innerhalb von 4 Stunden bis auf 8,5 bar angehoben und danach durch die Öffnung des Ventils wieder auf 0 bar abgesenkt. Der Verlauf der Messung ist in Tabelle 2 dokumentiert.

Bild Nr.	Druck [bar]	Uhrzeit	Zeit [hh:mm]
0	0	10:37:00 AM	00:00
1	1	10:49:00 AM	00:12
2	2	11:23:00 AM	00:46
3	3	11:44:00 AM	01:07
4	4	12:12:00 PM	01:35
5	5	12:53:00 PM	02:16
6	6	01:39:00 PM	03:02
7	7	02:22:00 PM	03:45
8	8,5	02:48:00 PM	04:11
9	7	03:00:00 PM	04:23
10	0,5	03:10:00 PM	04:33

Tabelle 2: Langsame Druckerhöhung und schnelle Druckabsenkung.

Hohe Aufnahmefrequenz (100Hz) bei 8 bar Zum Test, ob das Kamerasystem auch hohe Bilderfassungsfrequenzen bei hohem Druck aufnehmen kann, wurde die Druckkammer zunächst auf 8 bar gebracht. Dann wurden mit der pco.edge im *global shutter* Modus 200 Bilder mit einer Aufnahmefrequenz von 100 Hz und einer Auflösung von 1920 Pixel x 1080 Pixel (Full HD) aufgenommen. Dies entspricht ungefähr den zu erwartenden Bedingungen im KRG.

Langsame Druckabsenkung Um zu testen, ob die Kamera auch für längere Zeit unter Druck betrieben werden kann, wurde die Druckkammer auf 9 bar aufgepumpt und verschlossen. In den folgenden 5 Stunden wurde alle 100 Sekunden ein Bild aufgenommen (Aufnahmefrequenz $f_A = 0.01$ Hz). Dadurch, dass der Lichtwellenleiter nicht vollständig druckdicht war, nahm der Druck in dieser Zeit langsam bis auf 3.4 bar ab (siehe Tabelle 3).

Schnelle Druckabsenkung Zum Betrieb der Kamera im KRG ist es notwendig, dass die Kamera auch einen schnellen Drucksprung übersteht. Bei dem Betrieb im KRG verringert sich der Druck in weniger als einer Sekunde, um ca. 1 bar. Dieser schnelle Drucksprung lässt sich mit Hilfe des hier verwendeten Aufbaus nicht exakt reproduzieren. Um der plötzlichen Druckabnahme dennoch möglichst nahe zu kommen, wurde

Bild Nr.	Druck [bar]	Uhrzeit	Zeit [hh:mm]
1	8.5	09:45:00 AM	00:00
53	6.5	11:10:00 AM	01:25
101	5	12:30:00 PM	02:45
183	3.4	02:45:00 PM	05:00

Tabelle 3: Langsame Druckabsenkung über 5 Stunden.

der Druckbehälter zunächst auf 7 bar aufgepumpt und danach das Ventil vollständig geöffnet. Dabei ergab sich der in Tabelle 4 gezeigte Drucksprung.

Bild Nr.	Druck [bar]	Zeit
0	7	00:00:00
100	4.4	00:01:40
150	3.6	00:02:30
200	3	00:03:20
250	2.3	00:04:10
300	1.8	00:05:00
350	1.4	00:05:50
400	1	00:06:40
450	0.8	00:07:30
500	0.6	00:08:20
550	0.4	00:09:10
600	0.3	00:10:00

Tabelle 4: Schnelle Druckabsenkung von 7 bar auf 0 bar Überdruck innerhalb von 10 Minuten.

Aus- und Einschalten der Kamera Um zu testen, ob die Kamera auch bei hohen Drücken aus- und eingeschaltet werden kann, wurde die Druckkammer ein weiteres Mal auf 7 bar gebracht. Bei 7 bar wurden 10 Referenzbilder aufgenommen und danach wurde das Netzteil der Kamera vom Stromnetz getrennt. Die Kamera verblieb zunächst für ca. 2 Minuten im ausgeschalteten Zustand und wurde danach wieder eingeschaltet. Zum Vergleich wurde ein zweiter Satz von 10 Bilder aufgenommen.

4.2.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Funktion der Kamera Während des oben beschriebenen Drucktests wurde die Kamera insgesamt fünf Mal auf bis zu 9 bar Überdruck gebracht. Während des gesamten Tests waren keine Anzeichen eines Funktionsausfalls der Kamera zu beobachten:

Es konnte kein Bruch in dem Eingangsglas festgestellt werden und die Temperatur des CMOS-Chips lag fast kontinuierlich bei 4 Grad. Die Temperatur änderte sich nur während der schnellen Druckabsenkungen, bei der die adiabatische Expansion zu einer starken Temperaturabnahme der Luft führte. Diese länger dauernden, schnellen Druckabsenkungen sind im warmen Betrieb jedoch nur während des Herunterfahrens des KRG (d.h. Ablassen des Überdrucks) zu erwarten, während dessen keine Bilder aufgenommen werden. Auch das Ein- und Ausschalten der Kamera ließ sich bei Überdruck problemlos durchführen. Die Bilder vor und nach dem Ausschalten waren nahezu identisch und unterschieden sich nur im Bereich des Rauschens.

Deformation des Bildes Bei einem Vergleich der Bilder, die bei Überdruck aufgenommen wurden, mit Bildern bei Umgebungsdruck, fällt auf, dass sich die Bilder unterscheiden. Die regelmäßige Struktur der karierten Kästchen ist bei Überdruck leicht verschoben. Dies wird besonders deutlich, wenn man die Bilder dividiert, wie in Abbildung 14 zu sehen ist. Wenn man das Bild von links nach rechts betrachtet (x-Achse), erkennt man, dass die Strukturen in der Mitte des Bildes stärker verschoben sind, als am Bildrand. Ebenso scheint es zu sein, wenn man das Bild von oben nach unten betrachtet (y-Achse). Die Deformation ließ sich auch beim Vergleich anderer Drücke reproduzieren.

Die Ursache für die leicht verschobenen Strukturen könnte darin liegen, dass sich das karierte Papier leicht verschoben hat. Es könnte allerdings auch eine Deformation der optischen Komponenten, wie z.B. der Linse, des Eingangsglases oder des CMOS-Chips sein. Was die genaue Ursache ist, konnte im Rahmen der Messung nicht eindeutig ermittelt werden, jedoch lässt die gute Reproduzierbarkeit der Beobachtung und die stärkere Deformation in der Bildmitte auf eine Verformung der optischen Komponenten schließen. Für eine TSP-Messung stellt die Deformation kein besonderes Problem dar, weil die Deformation der Bilder nach der Aufnahme, mit Hilfe der TSP Software *nToPas*, herausgerechnet werden kann.

4.3 TSP-Kalibrierung

Um zu testen, ob die Kamera auch für quantitative Temperaturmessungen mittels TSP geeignet ist, wurde die *pco.edge* mit der *pco.sensicam* und der *pco.pixelfly* verglichen. Dabei ging es insbesondere darum, die gemessene relative Temperaturänderung zu vergleichen. Da die *pco.edge* eine CMOS-Kamera ist, muss im *global shutter* Modus jeweils ein Dunkelbild von dem eigentlichen Signalbild abgezogen werden, um das Rauschen möglichst gering zu halten (siehe Kapitel 3.1). Um auszuschließen, dass dies einen nachteiligen Effekt auf die quantitative Temperaturmessungen mittels TSP haben könnte, wurde eine Kalibrierung von TSP mit allen drei Kameras gleichzeitig durchgeführt und die Ergebnisse verglichen. Dazu wurde bei einer TSP Probe kontrolliert die Temperatur von 0 °C auf 32 °C erhöht und bei jedem Grad Celsius ein Bild aufgenommen. Der Verlauf der Intensitäten ist in Abbildung 15a und 15b gezeigt. Die absolut gemessenen Intensitäten der *pco.edge* sind deutlich größer, weil es sich um eine 16-bit

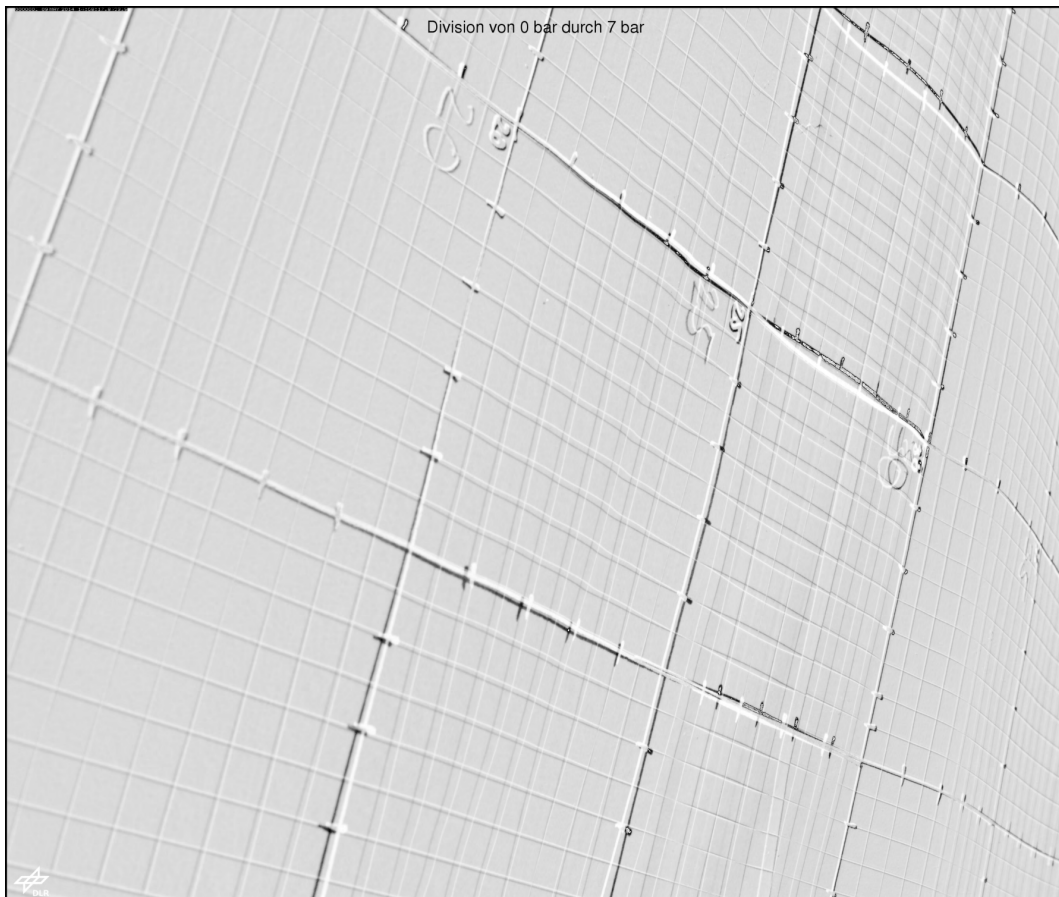
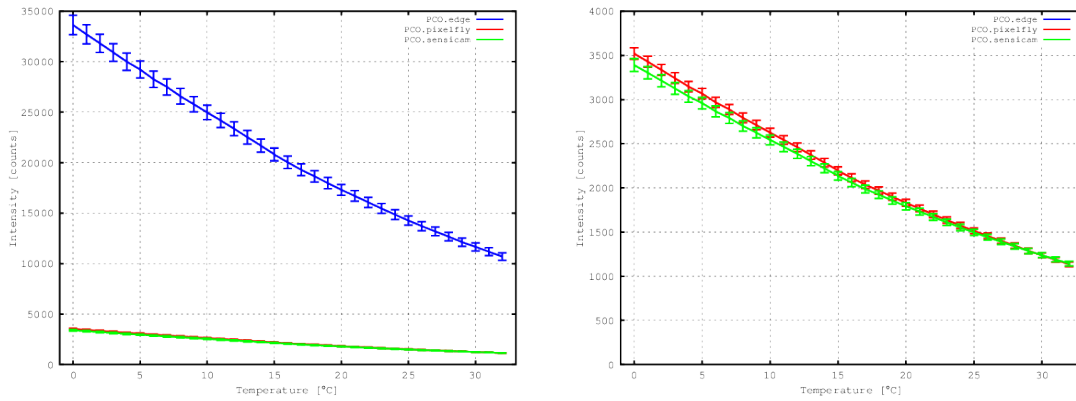


Abbildung 14: Division einer Aufnahme bei Umgebungsdruck durch eine Aufnahme bei 7 bar Überdruck. (Zur besseren Visualisierung wurde das Bild danach noch invertiert, d.h. sind schwarz und weiß vertauscht.) Man erkennt eine leichte Verschiebung der Linien insbesondere in der Bildmitte.



(a) Verlauf der Intensitäten in Abhängigkeit von der Temperatur. (b) Vergrößerung des Intensitätsverlaufs für pco.pixelfly und pco.sensicam

Abbildung 15

Kamera handelt.

4.4 Vergleich der normalisierten Intensitäten

Um den Intensitätsverlauf der Kameras vergleichen zu können, wurden die Intensitäten mit der Intensität bei $T_0 = 0 \text{ °C}$ normalisiert. Damit lassen sich die Kurven untereinander vergleichen (siehe Abbildung 16). Man erkennt, dass es zu einer geringfügigen Abweichung kommt, die allerdings im Rahmen des Fehlers liegt. Grundsätzlich scheint aber die pco.sensicam ein wenig stärker von den beiden anderen Kameras abzuweichen.

4.5 Vergleich der relativen Temperaturempfindlichkeit

Noch besser lassen sich die Kameras vergleichen, wenn man anstatt der normalisierten Intensität die Ableitung davon betrachtet. In Abbildung 17 ist die negative relative Temperaturempfindlichkeit aufgetragen, die man über die Berechnung des Gradienten erhält:

$$-\frac{\Delta I}{\Delta T} = -\frac{\frac{I_n - I_{n+1}}{\frac{I_n + I_{n+1}}{2}}}{T_n - T_{n+1}} = -\frac{2(I_n - I_{n+1})}{I_n + I_{n+1}} \quad (1)$$

Wie man erkennt, stimmen die Verläufe der relativen Temperaturempfindlichkeit sehr gut überein. Als Fehler wurde die Standardabweichung bei der Messung der Intensität mittels nToPas angenommen. Für die relative Temperaturempfindlichkeit wurde der Fehler über das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet.

Um sicher zu stellen, dass die Ergebnisse reproduzierbar sind, wurde die gleiche Messung mit der pco.sensicam und der pco.edge nochmals wiederholt. Die Ergebnisse stimmen gut überein, wie sich aus den Abbildungen 18 - 20 erkennen lässt.

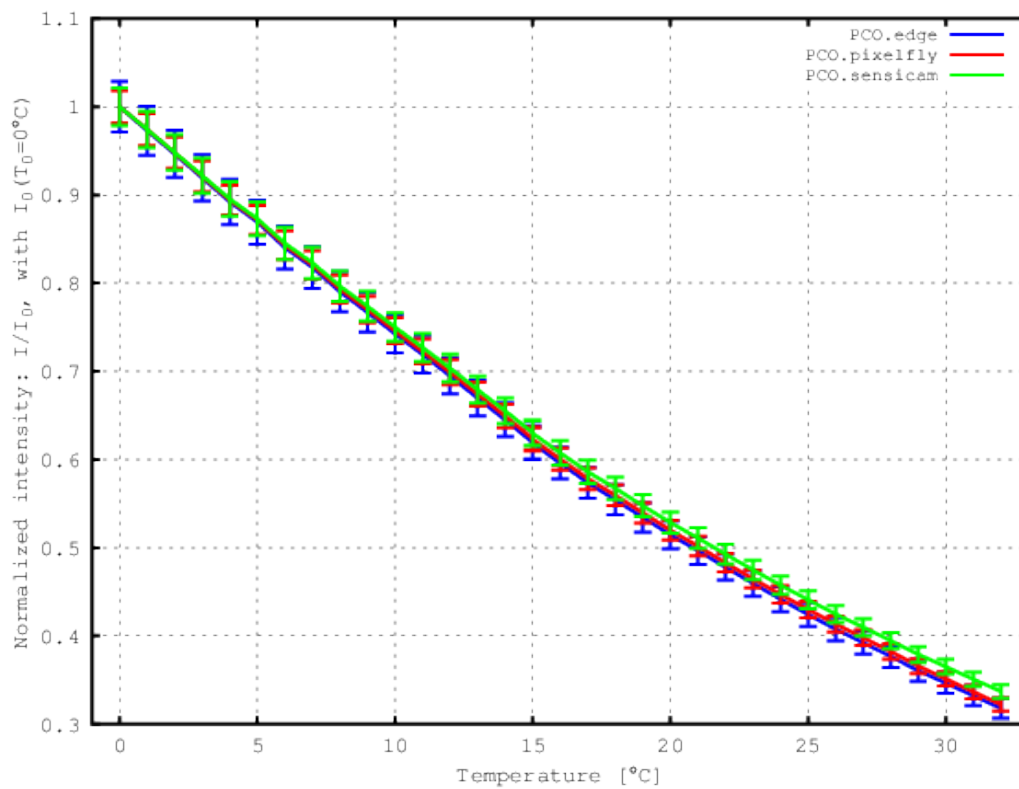


Abbildung 16: Verlauf der normalisierten Intensitäten in Abhängigkeit von der Temperatur.

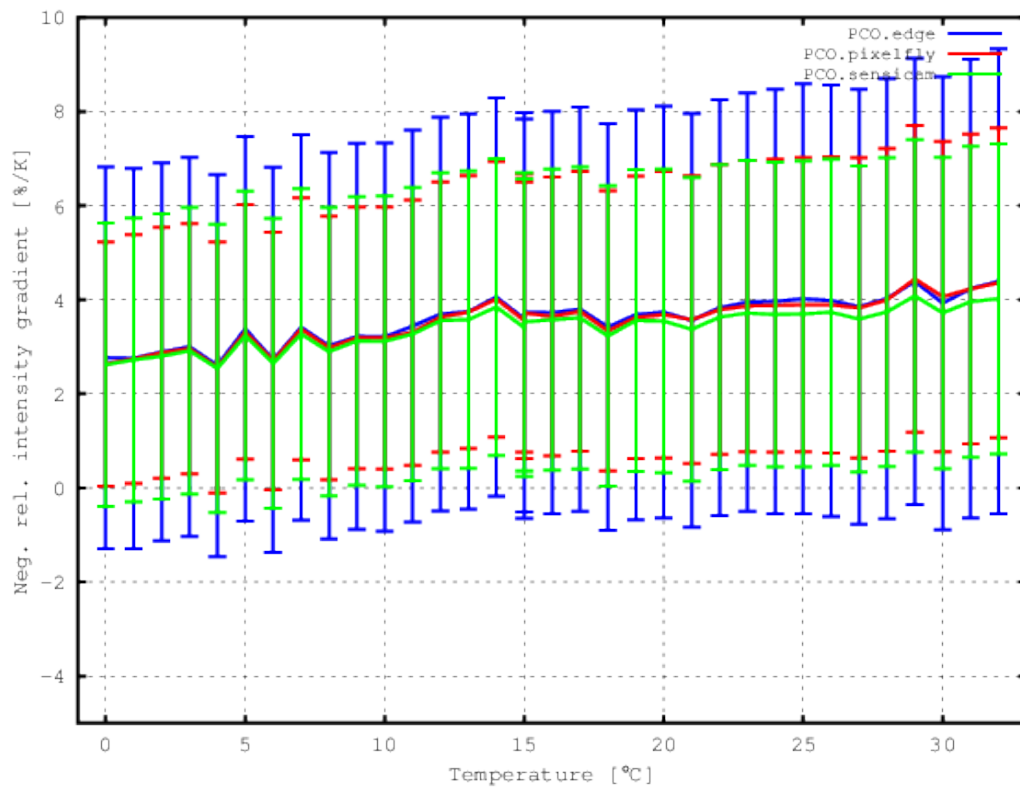
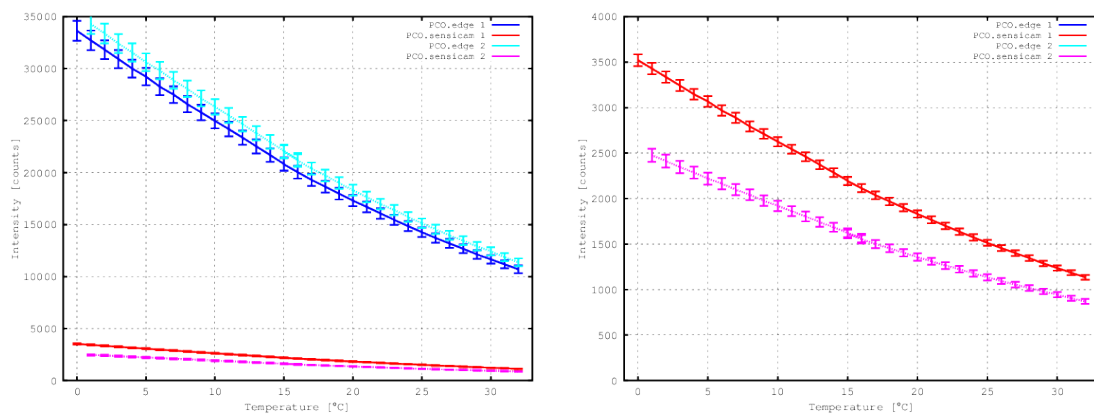


Abbildung 17: Verlauf der negativen relativen Temperaturempfindlichkeit.



(a) Verlauf der Intensitäten in Abhängigkeit von der Temperatur. (b) Vergrößerung des Intensitätsverlaufs für pco.pixelfly und pco.sensicam

Abbildung 18

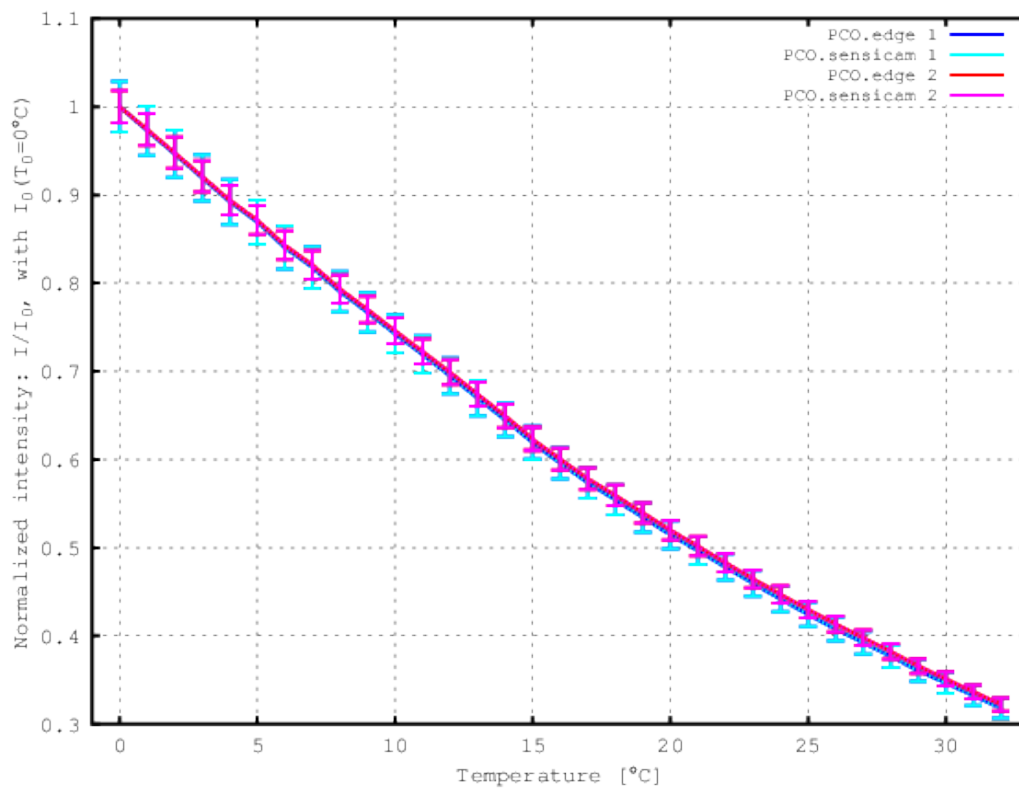


Abbildung 19: Verlauf der normalisierten Intensitäten in Abhängigkeit von der Temperatur.

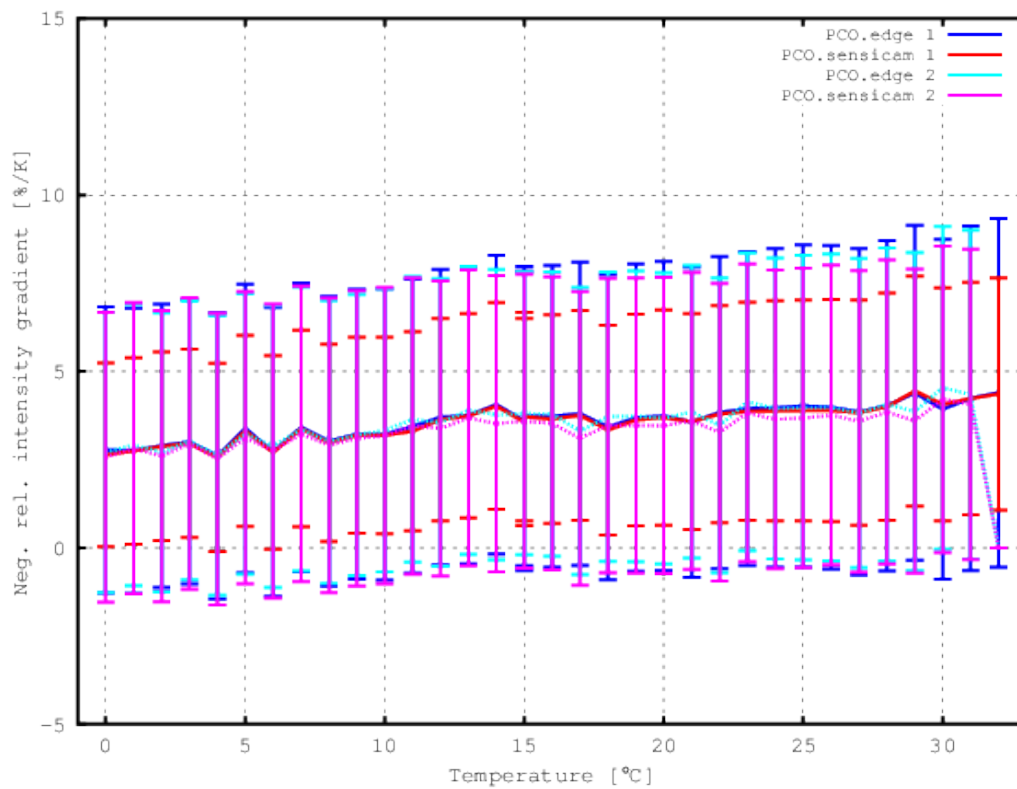


Abbildung 20: Verlauf der negativen relativen Temperaturempfindlichkeit.

5 Ausblick

Druckundichtigkeit des Lichtwellenleiters Es stellte sich heraus, dass die Lichtwellenleiter (LWL) nicht vollständig druckdicht sind, so dass stets etwas Druckluft über die LWL aus dem Druckbehälter entwich. Daher sollte nochmals nach druckdichten LWL oder anderen Alternativen gesucht werden. Eine alternative Möglichkeit bestünde z.B. in der Verwendung von "Pflitsch Uni Flanschen" zur Durchführung der CameraLink-Kabel, da diese bis zu 10 bar druckdicht sind. Sie erlauben eine Durchführung von Kabeln mit 2 bis 20 mm Durchmesser und haben teilbare Dichteinsätze, die beliebige Steckergrößen ermöglichen.

Betrieb bei kryogenen Temperaturen Bei kryogenen Temperaturen, von bis zu -160°C , kann die Kamera nicht ohne Weiteres betrieben werden, jedoch ließe sich für diese Zwecke ggf. ein zusätzlich beheiztes Gehäuse konstruieren. Solche Thermoboxen existieren beispielsweise am European Transonic Windtunnel (ETW), an deren Konstruktion man sich ggf. orientieren könnte. Somit ließe sich evtl. auch ein Betrieb bei kryogenen Temperaturen verwirklichen und damit der gesamte Reynolds- und Machzahlbereich des KRG ausnutzen.

6 Danksagung

Die hier vorgestellten Untersuchungen wären nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung von der Firma PCO. Für den Probeaufbau und die Drucktests wurden zwei pco.edge Kameras zur Verfügung gestellt. Die Temperaturuntersuchungen wurden von PCO durchgeführt und die Ergebnisse dem DLR freundlicherweise mitgeteilt. Dafür möchten wir uns hier nochmals recht herzlich bedanken. Besonderer Dank gilt vor allem Herrn Peter Dür, der während der ganzen Zeit als Ansprechpartner diente und uns in allen Fragen schnell und freundlich weitergeholfen hat.